

Ю. Н. Оленева^{1,2}

¹ Университет имени Фридриха-Александра Эрланген-Нюрнберг, г. Эрланген

² Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Научный руководитель — доц., канд. техн. наук С. Л. Демаков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ С ПРОГРАММОЙ FLOW-3D

Металлические литейные процессы являются одними из самых сложных моделей для точной промышленности. Flow-3D предназначена для того, чтобы помочь материалововедам поэтапно моделировать процесс литья в форму, программа может определить и высчитать все ключевые этапы процесса.

Ключевые слова: литье, Al сплав, пористость, дефекты, Flow-3D.

Yu. N. Oleneva

THE DESIGN OF THE CASTING PROCESS WITH FLOW-3D

Metal casting applications are some of the most challenging simulations to run accurately. FLOW-3D is designed to help engineers navigate through the simulation steps in a simple, logical sequence that closely follows key processes.

Key words: Flow-3D, casting, Al alloy, porosity, defects.

Flow-3D — это программа для реалистичного моделирования потоков со свободными поверхностями. В начале моделирования нужно задать продолжительность моделирования «Model-Setup/general». Для определения времени необходимо знать параметры процесса (вязкость, турбулентность) и граничные условия. Единицы измерения задаются в «custom». Значения вязкости материала можно определить из литературы. Тип потока зависит от скорости потока, от вязкости и плотности жидкости. Число Рейнольд (Re) было введено для определения типа потока. Поток с $Re > 2300$ считается ламинарным, а если $Re < 2300$ — турбулентным.

Для сплава $AlSi9Cu3$ $Re = 10^5$ — поток ламинарный. В качестве расчетной модели была выбрана RNG (Renormalized Group), подходящая для литейных операций с турбулентным потоком. Литье происходит при температуре около $700^\circ C$, при моделировании можно ориентиро-

ваться на текучесть воды. Поверхностное натяжение расплава играет важную роль в моделировании. Коэффициент поверхностного напряжения в данном случае 0,35, а угол контакта 135° , по умолчанию выбирается «explicit».

Форма литья рассматриваться в качестве физического граничного условия. Flow-3D также предоставляет возможность «Defect-Trackings» (возникновения и развития дефектов поверхности). Серьезной проблемой при изготовлении литой детали под давлением является воздух, который ухудшает механические свойства. В Flow-3D есть два важных параметра: коэффициент частоты возникновения воздушных включений (0,5) и коэффициент поверхностного натяжения (0,35).

Параметры, используемые для расплава AlSi9Cu3: плотность — 2445 кг/м^3 ; вязкость — $5 \cdot 10^{-3}$; удельная теплоемкость — $1056 \text{ J/(кг} \cdot \text{K)}$; теплопроводность — $65 \text{ W/(м} \cdot \text{K)}$. Материал литейной формы — сталь H-13. Эксперимент будет смоделирован для пластин с толщиной 4 и 8 мм и высотой 400 мм.

Необходимо изменить сетку моделирования, уменьшить количество ячеек, т. е. максимально сократить вычисления. Вся отливка разделяется на несколько областей по геометрии и преобладающим процессам (на рис. 1 всего 7 участков). Для каждой области создается сетка, состоящая из ячеек размером от 1 до 4 мм, но должно соблюдаться условие: ячейки находятся друг в друге, без зазора. Выход потока в форму является критической точкой для процесса, потому что там из-за разности скоростей потоков и давления может возникать турбулентность (минимум 1 узел, а сетка — 1 мм).

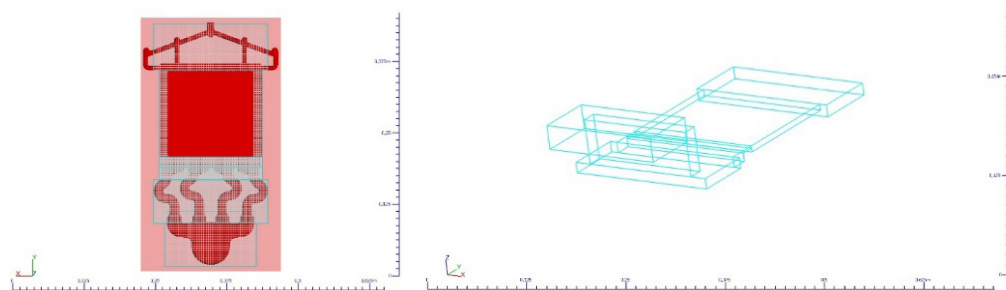


Рис. 1. Изображение сетки, используемой для моделирования

Дополнительные граничные условия: скорость расплава по оси z — 2 м/с; температура расплава 700°C ; температура формы 300°C (вкладки: «output» — «restart data» и «data history» (1 с), «selected data» (0,001 с). В разделе «Numerics» для «initial time step» устанавливается значение

$1 \cdot 10^{-6}$, при этом минимальный шаг времени — $1 \cdot 10^{-13}$ с. Этот параметр определяет, какой шаг времени должен быть в начале процесса и минимальный промежуток времени между двумя этапами вычисления.

Далее с помощью 3D-модели показаны скорость расплава на выходе и путь, пройденный в процессе моделирования (рис. 2). Скорость на выходе принимает максимальные значения — 35 м/с. Различные скорости потока объясняются изменением сечения, как следствие, возникает турбулентность потока.

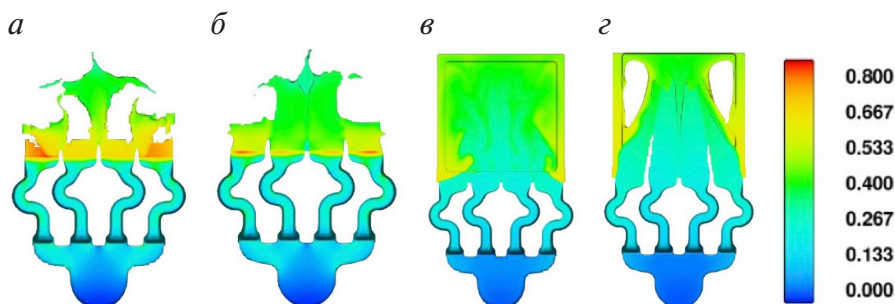


Рис. 2. Путь расплава в форме:

а, б — скорость в момент выхода, м/с; *в, г* — путь, пройденный сплавом формы, в конце моделирования, м;

На рис. 2, *в, г* изображен путь расплава в форме, разница заполнения заметна. Это происходит из-за того, что количество ячеек в незакрашенных областях ниже критического или время моделирования недостаточно, программа прерывает процесс слишком рано.

Моделирование с изменением параметров процесса. В этой части эксперимента оценивались модели с изменением толщины пластины от 2 до 5 мм, скорость подачи от 0,5 до 1 м/с. Пластины сравниваются с точки зрения пористости; дефектов; пути, пройденного расплавом; температуры расплава и скорости расплава при выходе и текучесть в литейной системе. На рис. 3 показано движение расплава при разной скорости поршня. Хорошо видно, что передняя часть расплава опускается со скоростью поршня 1 м/с (рис. 3, *а*). При этом воздух и оксиды попадают в расплав, качество деталей снижается. При скорости поршня 0,5 м/с подача достаточно медленная (рис. 3, *б*), чтобы не образовалось завихрений, но медленные скорости и, следовательно, более длительное время пребывания в литейной камере приводят к образованию большего количества оксидов (на рис. 3 (*а, б*) слева: 2D для оценки температуры; справа: 3D для оценки скорости).

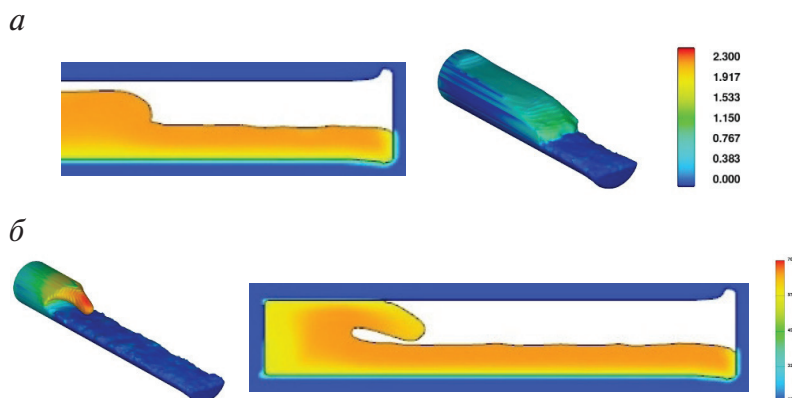


Рис. 3. Отображение движения расплава в литейной форме во время процесса застывания со скоростью заполнения:

$a - 0,5 \text{ м/с}$; $б - 1 \text{ м/с}$

На рис. 4 показано в 2D поперечное сечение детали после процесса литья. Пластины с меньшей толщиной содержат значительно меньше пор. Расплав сначала заполняет центр плиты, блокируя воздух, и, как следствие, наибольшая пористость по краям.

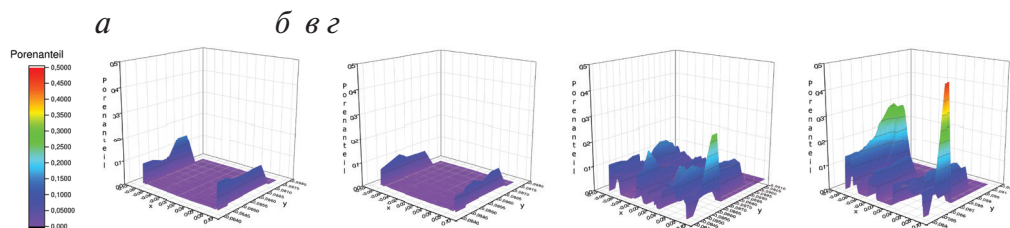


Рис. 4. Доля пор в пластине в конце процесса литья по горизонтальному сечению пластины в 2D:

$a - 2 \text{ мм}, 0,5 \text{ м/с}$; $б - 2 \text{ мм}, 1 \text{ м/с}$; $в - 5 \text{ мм}, 0,5 \text{ м/с}$; $г - 5 \text{ мм}, 1 \text{ м/с}$

В деталях присутствует большее количество дефектов при увеличении толщины и более высокой скорости заполнения формы (рис. 5), т. к. движение потока у плит толщиной 5 мм более турбулентно и обратный поток образует оксиды. Они возникают, когда расплав преждевременно застывает и оседает. Решение проблемы — более быстрое заполнение формы.

На рис. 6 показана температура в конце процесса литья. На 2 мм пластинах видно, что в верхней части детали расплав уже начал остывать. При сравнении отливок 5 мм пластины показывают более низкую температуру в конце процесса литья, а на рис. 6, в, г отображаются более холодные области, где поток имеет больший пройденный

путь. Из этого можно сделать вывод, что часть тепла расплава расходуется на нагрев формы.

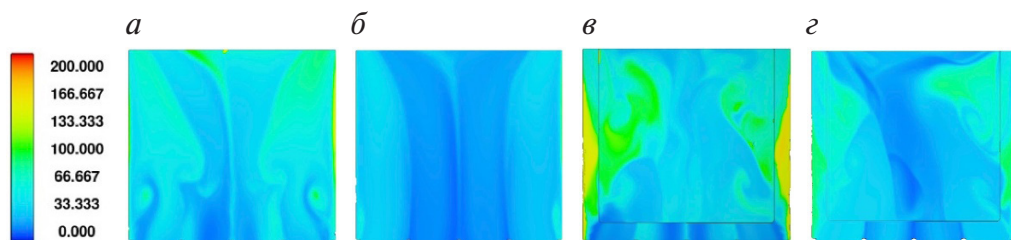


Рис. 5. Дефекты, возникшие при усадке расплава в литейной камере, в пластине в процессе литья:

a — 2 мм, 0,5 м/с; *б* — 2 мм, 1 м/с; *в* — 5 мм, 0,5 м/с; *г* — 5 мм, 1 м/с

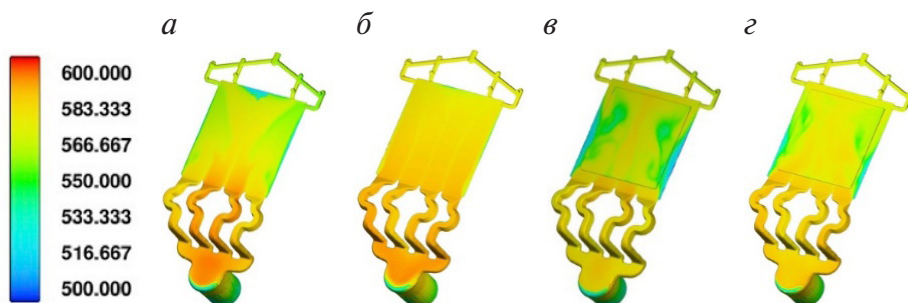


Рис. 6. Температура расплава в конце процесса литья:

a — 2 мм, 0,5 м/с; *б* — 2 мм, 1 м/с; *в* — 5 мм, 0,5 м/с; *г* — 5 мм, 1 м/с

Для проверки этого утверждения температура расплава и формы были оценены в 2D (рис. 7 слева: во время фасонной заливки; справа: в конце процесса литья; снизу: литье под давлением пластины в конце процесса). По рис. 7 можно определить, что нагрев формы около 100 °С, это является не критическим по сравнению с температурой расплава.

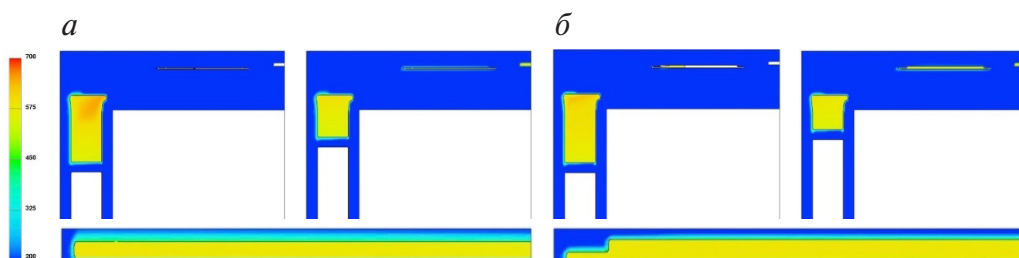


Рис. 7. Температуры расплава и инструмента для тепла, выделяемого на деталь:

a — 2 мм, 0,5 м/с; *б* — 5 мм, 1 м/с

В работе с программой Flow-3D из-за малейших ошибок при моделировании процесса могут возникнуть дефекты или сбой всей системы. При увеличении толщины плит или скорости поршня пористость значительно увеличилась за счет большего количества завихрений и перекрытий потока. Процесс моделирования достаточно долгий, но таким образом скорость поршня и геометрические размеры могут быть оптимизированы экономично и быстро.